

ний скольжения [1]. Очевидно, равномерность поля деформаций будет зависеть от протяженности горизонтального участка.

После второго прохода с противодавлением 150 МПа наблюдается рост интенсивности сдвиговой деформации во всех зонах образца (рис. 4,б). Для очага деформации характерно образование вихревого поля смещений элементов сетки, что свидетельствует об интенсивном образовании высокоугловых границ в процессе пластической деформации [5].

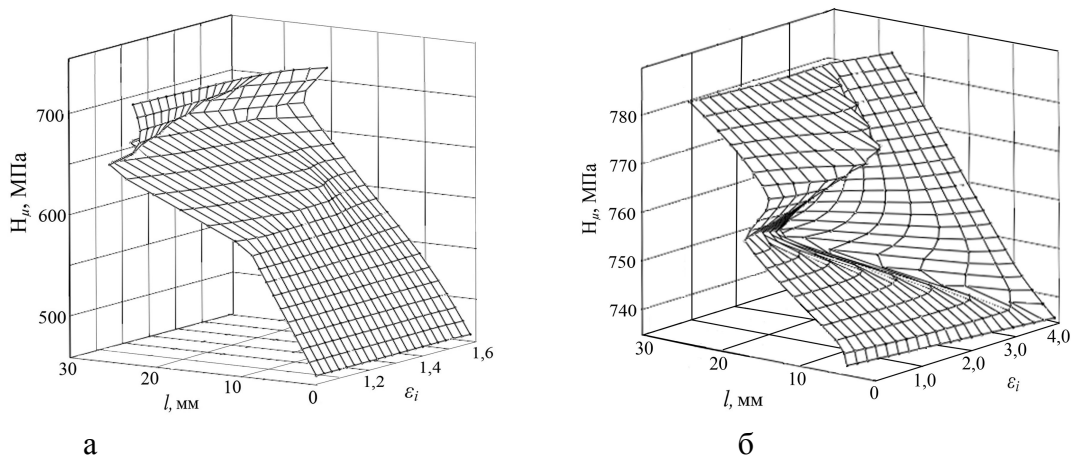


Рис. 5. Изменение микротвердости после первого прохода – а, после второго прохода – б

Для оценки упрочнения материала измеряли микротвердость, количество измерений на одну точку составляло 16. Нагрузка составляла 25 г, погрешность измерений 8-10%. Наблюдается немонотонное изменение микротвердости по сечению образца. В очаге деформации, как после первого, так и после второго проходов получена максимальная микротвердость. Таким образом, экспериментально рассмотрена установившаяся стадия порошкового пористого материала при одном и двух проходах РКУ-прессования. На основе полученных полей интенсивности сдвиговой деформации и микротвердости исследован характер формоизменения. С помощью РКУ-прессования получен компактный материал из образца с исходной пористостью 42%.

**Список литературы:** 1. Сегал В.М. Процессы пластического структурообразования металлов / В.М.Сегал, В.И.Резников, В.И.Копылов // Минск:Наука и техника, 1994. –232 с. 2. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров // М.: Логос, 2000. – 272 с. 3. Периг А.В. Численное математическое моделирование основных показателей качества при равноканальном угловом прессовании на основе решения уравнения переноса вихря / А.В. Периг, Н.Н. Голоденко, А.М. Лаптев [и др.] // Обработка материалов давлением, 2010, №1 (22). – С . 70-76. 4. Рене И.П. Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки / И.П. Рене // Тула, ТПИ, 1970. – 146 с. 5. Бейгельзимер Я.Е. Некоторые соображения по поводу больших пластических деформаций, основанные на их аналогии с турбулентностью / Я.Е. Бейгельзимер // Физика и техника высоких давлений, 2008, Т.18, №4 – с. 77-87.

**УДК 621.777.4**

**АЛИЕВА Л.И.**, канд. техн. наук, ст. препод., ДГМА, г. Краматорск

**МАРТЫНОВ С.В.**, ассистент, ДГМА, г. Краматорск  
**ГРУДКИНА Н.С.**, ассистент, ДГМА, г. Краматорск

## **НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ХОЛОДНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ВТУЛОК С ФЛАНЦЕМ**

За допомогою експериментально-аналітичного методу координатних ділительних сіток визначені компоненти тензора деформацій і напружень, компоненти девіатора напружень і гідростатичний тиск при вісесиметричному видавлюванні внутрішнього фланця із трубної заготовки.

With the help of experimental and analytical method of dividing the coordinate grid defined by the components of the stress and strain, the components of deviatoric stress and hydrostatic pressure for axisymmetric extrusion of the inner flange of the tube work piece.

С помощью экспериментально-аналитического метода координатных делительных сеток определены компоненты тензора деформаций и напряжений, компоненты девиатора напряжений и гидростатическое давление при осесимметричном выдавливании внутреннего фланца из трубной заготовки.

Точная холодная объемная штамповка (ТХОШ) позволяет получать заготовки и детали взамен обработки резанием, литья и горячей штамповки. При этом достигается значительная экономия металла (в некоторых случаях коэффициент использования металла достигает 98 %), повышается статическая и динамическая прочность, волокно направлено вдоль контура детали и отсутствуют его подрезы. При ТХОШ возникает деформационное упрочнение. Знание распределения деформаций и напряжений позволяет оценивать неоднородность распределения механических свойств заготовки по сечению, определять ресурс пластичности металла, устанавливать картину течения и на основании этого и рационально проектировать геометрию инструмента.

В нефтегазовом, аэрокосмическом, автомобильном машиностроении получили применения детали типа втулок с внутренним фланцем. Основные способы получения подобных втулок методами точной холодной объемной штамповки - это прямое и обратное выдавливание с просечной перемычки, торцовая раскатка, высадка и радиальное выдавливание трубчатой заготовки. При прямом и обратном выдавливании критическая высота перемычки (до просечки) должна быть равна толщине стенки детали [1], что ограничивает номенклатуру штампуемых изделий и увеличивает технологические припуски под механообработку. Процесс торцовой раскатки требует специализированного оборудования [2] и менее производителен по сравнению с процессами штамповки. При высадке трубы внутренний диаметр высаженного фланца ограничивается критической высотой, высаживаемого участка трубчатой заготовки [1]. Исследование процесса радиального выдавливания внутренних фланцев представляет собой актуальную задачу ввиду слабой изученности способа и отсутствия технологических рекомендаций по проектированию техпроцесса.

Цель данного исследования – определение напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при центростремительном выдавливании фланца из трубчатой заготовки.

Для определения деформированного состояния в данной работе использован экспериментально-аналитический метод координатных делительных сеток, который позволяет качественно и количественно оценить распределение деформаций и напряжений в объеме заготовки [3, 4]. Заготовка имела следующие размеры: внутренний и наружный диаметр 28,2х36 мм, высота 21,3 мм. Радиус закругления переходной кромки оправки 1,8 мм, высота зазора между верхней и нижней втулкой разборной оправки 3,2 мм (высота фланца). Сетка была нанесена строганием и имела базу 2 мм. Образцы при деформации не спаивались, так как раскрытие полувтулок при центростремительном выдавливании не происходит.. Экспериментальная оснастка состояла из контейнера 1 (рис.1, а), противоуансона 2, подкладного кольца 3, разборной оправки 4, матрицы 5, пуансона 6, подкладной плиты 7. Деформирование происходило на испытательной машине МС-500. После каждого этапа деформации заготовки измерялись и сканировались. Координаты узлов пересечения делительной сетки измерялись с помощью программы Grafula 3. Далее по методике И.П. Ренне [3] в пакете MathCAD рассчитывались компоненты тензора деформаций и интенсивность деформаций.

Решение краевых задач по определению напряженного состояния предполагает монотонность функции. Если деформация немонотонна, а в данном случае можно говорить что она квазимоноотонна только в зоне над нижним торцом фланца, то это приводит к погрешностям расчета. В качестве граничного условия принимаем значение радиального напряжения равное нулю  $\sigma_r = 0$  на свободной от нагрузок внутренней поверхности фланца. Направление расчета (см. табл.1 по  $\sigma_r$ ) слева направо по горизонтальному ряду ячеек. Переход на ряд выше происходит по предпоследней, третей, ячейке ряда. Крайние значения напряжений первого ряда не рассчитаны, так как при расчете, по правилу трапеций, требуются контурные значения девиатора сдвиговых напряжений. Попытка получения последних экстраполяцией полиномом n-ой степени не дала положительных результатов ввиду не монотонности функции. В результате расчета в пакете MathCad получали матрицы значений напряжений, контурные графики распределения компонент напряжений в цвете, а также график, имитирующий координатную сетку. Далее график с координатной сеткой накладывался на графики распределения деформаций и напряжений, экстраполированные области обрезались в пакете CorelDRAW и записывали значения компонент НДС в ячейках.

При известном тензоре деформированного состояния, компоненты девиатора тензора напряженного состояния вычисляются по соотношениям деформационной теории пластичности упрочняющегося материала [5, 6]. Компоненты девиатора напряжений:

$$S_r = \sigma_r - \sigma_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot \varepsilon_r; \quad S_\theta = \sigma_\theta - \sigma_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot \varepsilon_\theta; \quad S_z = \sigma_z - \sigma_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot \varepsilon_z \quad (1)$$

При сложном нагружении девиатор касательных напряжений следует определять из соотношений теории течения:

$$S_{\tau_{rz}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot \varepsilon_z \quad (2)$$

Для определения гидростатического давления интегрируем одно из уравнений равновесия для осесимметричной деформации. Согласно первому из этих уравнений:

$$(\sigma_r)_B = (\sigma_r)_A \pm \int_A^B \left[ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{S_r - S_\theta}{r} \right] dr. \quad (3)$$

По второму уравнению:

$$(\sigma_z)_D = (\sigma_z)_C \pm \int_C^D \left[ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} \right] dz. \quad (4)$$

Выполняя численное интегрирование по правилу трапеций для  $i, j$  ячейки выражения (3) и (4) можно записать в следующем виде:

$$(\sigma_r)_{i,j} = (\sigma_r)_{i,j+1} - \frac{(S_{\tau_{rz}})_{i+1,j} - (S_{\tau_{rz}})_{i-1,j}}{(b_z)_{i,j} + (b_z)_{i-1,j}} - ((S_r)_{i,j} - (S_\theta)_{i,j}) \cdot \ln \left( \frac{(r)_{i,j}}{(r)_{i,j+1}} \right); \quad (5)$$

$$(\sigma_z)_{i,j} = (\sigma_z)_{i-1,j} - \frac{(S_{\tau_{rz}})_{i,j+1} - (S_{\tau_{rz}})_{i,j-1}}{(a_r)_{i,j} + (a_r)_{i,j-1}} - \frac{(S_{\tau_{rz}})_{i,j}}{(r)_{i,j}} \cdot ((z)_{i,j} - (z)_{i-1,j}), \quad (6)$$

Или:

$$(\sigma_r)_{i,j} = (\sigma_r)_{i,j+1} - ((S_{\tau_{rz}})_{i+1,j} - (S_{\tau_{rz}})_{i-1,j} + (S_{\tau_{rz}})_{i+1,j+1} - (S_{\tau_{rz}})_{i-1,j+1}) \cdot \frac{(r)_{i,j+1} - (r)_{i,j}}{4 \cdot ((z)_{i+1,j} - (z)_{i,j})} - ((S_r)_{i,j} - (S_\theta)_{i,j}) \cdot \ln \left( \frac{(r)_{i,j}}{(r)_{i,j+1}} \right) \quad (7)$$

$$(\sigma_z)_{i,j} = (\sigma_z)_{i-1,j} - ((S_{\tau_{rz}})_{i,j+1} - (S_{\tau_{rz}})_{i,j-1} + (S_{\tau_{rz}})_{i-1,j+1} - (S_{\tau_{rz}})_{i-1,j-1}) \cdot \frac{(z)_{i+1,j} - (z)_{i,j}}{4 \cdot ((r)_{i+1,j} - (r)_{i,j})} - \frac{(S_{\tau_{rz}})_{i,j}}{(r)_{i,j}} \cdot ((z)_{i,j} - (z)_{i-1,j}) \quad (8)$$

где  $a_r, b_z$  - проекции параметров ячейки на оси  $r$  и  $z$ , соответственно;

$r_{i,j}, z_{i,j}$  - координата  $i, j$  ячейки.

Определив одно из напряжений  $\sigma_r, \sigma_z$ , вычитаем из него соответствующую компоненту девиатора напряжений (1) и находим гидростатическое давление  $\sigma_0$ . Прибавив его к остальным компонентам девиатора, находим соответствующие им напряжения.

Если пластическая зона имеет свободный от нагружения контур, то окружающее напряжение у этого контура равно:

$$\sigma_\theta = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \cdot (\varepsilon_\theta - \varepsilon_n), \quad (9)$$

где  $\varepsilon_n$  - главная деформация в направлении нормали к контуру.

Следовательно, гидростатическое давление и остальные напряжения можно определить по формулам:

$$\sigma_0 = \sigma_\theta - S_\theta; \quad \sigma_r = \sigma_0 + S_r; \quad \sigma_z = \sigma_0 + S_z. \quad (10)$$

Эти напряжения могут быть использованы как граничные условия.

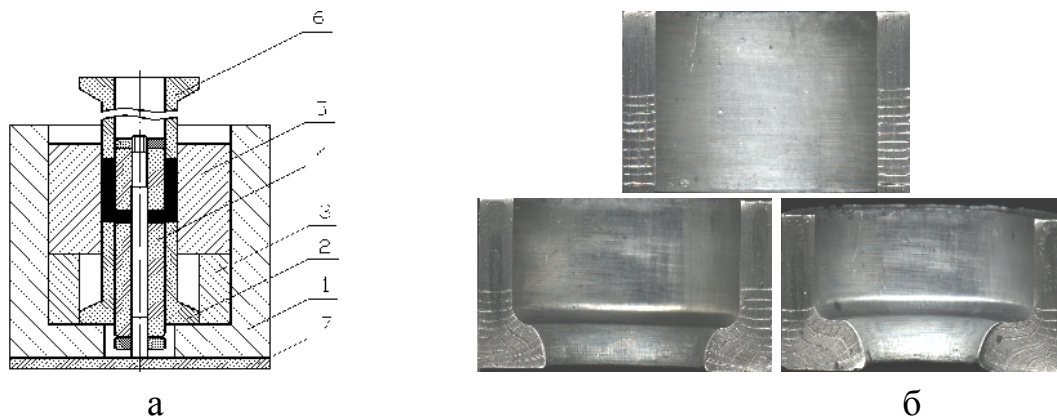


Рис.1 – Штамповая оснастка и картины поэтапного изменения делительной сетки

Таблица 1 - Результаты радиального выдавливания АД 31 радиус закругления оправки 1,8 мм, высота фланца 3,2 мм, заготовка 28,2x36мм

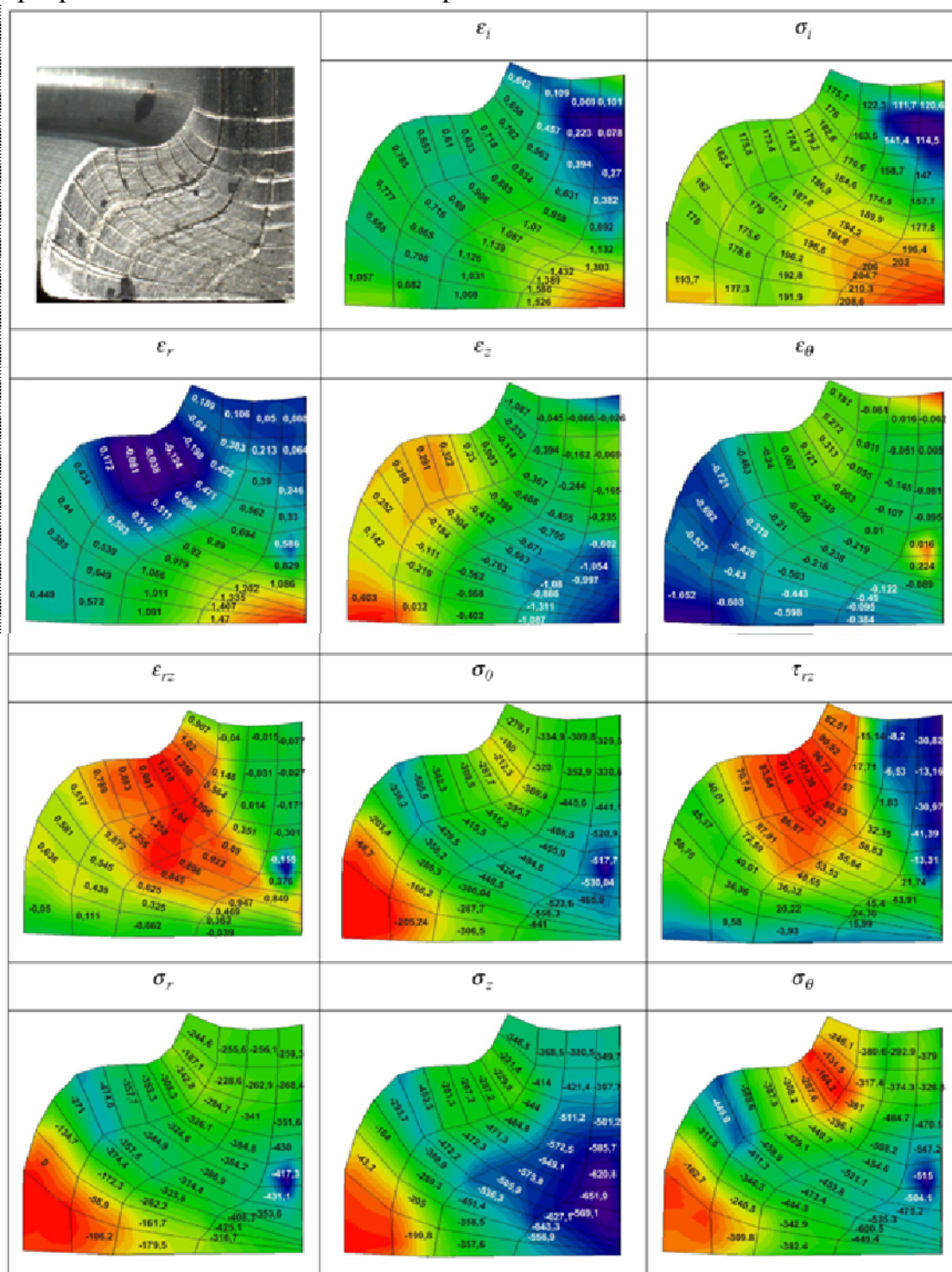
№	Высота, мм, радиус фланца $R_k$	Ход, мм	Усилие, кН
1	21,3 (начальное положение), $R_k=28,2 / 2$		
2	17,7, $R_k=19.4/2$	3,6	130
3	15,5, $R_k=14.2/2$	2,2	165

Наиболее деформированной областью заготовки является область в зоне нижнего торца фланца у наружной стенки (см. табл.2 по  $\varepsilon_i$ ). Значения логарифмической деформации немонотонно убывают в направлении внутренней стенки фланца, причем такой характер соблюдается до середины высоты фланца, по наружной стенке, в направлении от нижнего торца фланца. Выше середины фланца характер изменения деформации меняется в виду того, что ячейки, примыкающие к наружной стенке, становятся менее проработанными, а ячейки, примыкающие к переходной кромке оправки, более продеформированы чем последние. Максимальные значения деформации по  $\varepsilon_r$  также находятся в зоне, примыкающей к нижнему торцу фланца.

Очаг деформации ограничивается параболической кривой, проходящей от верхней точки радиуса закругления переходной кромки оправки до середины высоты фланца у наружной стенки. Значения меняют свой знак в ячейках у переходной кромки, что свидетельствует о сжатии металла в зоне разворота металла у оправки. Значения деформации по  $\varepsilon_z$  имеют отрицательные значения, максимальные значения по модулю достигаются в зоне нижнего торца фланца у наружной стенки. Наличие положительных значений деформаций в ячейках, примыкающих к внутренней стенке фланца, объясняется несовершенством методики расчета в ячейках, которые подвергаются повороту, а также погрешностью расчета связанной с большой базой делительной сетки. Уменьшение размеров ячеек в этой зоне позволит повысить точность расчетов и нивелировать влияние поворота ячейки. Зона максимальных значений окружной деформации  $\varepsilon_\theta$  сосредотачивается у внутренней стенки фланца. А зона максимальных сдвиговых деформаций  $\varepsilon_{rz}$ , описывается параболическими кривыми, отсекающих сектор от переходной кромки, прилегающей к оправке, до ячеек, сосредоточенных у наружной стенки в зоне нижнего торца фланца.



Таблица 2 – Напряженно-деформированное состояние в очаге деформации при радиальном выдавливании фланцев



Зависимость напряжения от деформации, полученная при испытании на осадку цилиндрического образца, описывается уравнением  $\sigma_s = 191.55 \cdot \epsilon_i^{0.202}$ . Картина распределения интенсивности напряжений аналогична распределению интенсивности деформации. Максимальные значения достигают 210,3 МПа, а минимальные 111,7 МПа. Гидростатическое давление имеет отрицательное значение во всех ячейках сечения, что говорит о благоприятной схеме напряженного состояния, способствующей увеличению пластичности материала. Максимальные сдвиговые напряжения  $\sigma_{rz}$  сосредотачиваются в зоне переходной кромки оправ-

ки, а максимальные радиальные напряжения у наружной стенки в зоне нижнего торца фланца. Зона максимальных высотных напряжений  $\sigma_z$  сосредотачивается, также, у наружной стенки и по высоте равна высоте фланца. Максимальные окружные напряжения  $\sigma_\theta$  сосредотачиваются в зоне нижнего торца фланца и у наружной стенки заготовки.

## ВЫВОДЫ

С помощью экспериментально-аналитического метода координатных делительных сеток определены компоненты тензора деформаций и напряжений, компоненты девиатора напряжений и гидростатическое давление при осесимметричном выдавливании внутреннего фланца из трубной заготовки. Анализ НДС показал, что картина распределения напряжений соответствует распределению деформаций. Наиболее проработанной является область в зоне нижнего торца фланца у наружной стенки фланца. Гидростатическое давление имеет отрицательное значение по всему очагу деформации, что способствует повышению пластичности и снижает вероятность разрушения металла.

**Список литературы:** 1. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке металлов давлением / Огородников В.А. Киев: Вища школа, 1983. 175 с. 2. Матвійчук В. А. Розробка процесів штампування порожнистих виробів методами видавлювання та обкочування/ В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, Л. І. Алієва // Совершенствование процессов и оборудования обработки в металлургии и машиностроении.— Тем. сб. научн. тр., Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорськ. — 2003. С. 359-363. 3. Ренне И.П. Теоретические основы экспериментальных методов исследования деформаций методом сеток в процессах обработки металлов давлением / И. П. Ренне // - Тула: ТПИ, 1979. - 96 с. 4. Ренне И. П. Обобщение метода обработки результатов искажения делительной сетки, предложенного П. О. Пашковым, для исследования процессов сложного деформирования / И. П. Ренне // Исследования в области пластических деформаций и обработки металлов давлением Сб. Технология машиностроения. Вып. 1. Тула, Приокское изд-во, 1967. — 176 с. 5. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости / Г. Д. Дель. — М.: Машиностроение, 1971. -200с. 6. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. — М.: Машиностроение, 1978.— 176с

УДК 539.374.001.8.621.7 – 111

**ЧИГИРИНСКИЙ В. В.**, докт. техн. наук, профессор, зав. каф. ОМД  
**ОБДУЛ В. Д.**, доц. к.т.н., каф. ОМД, ЗНТУ, г. Запорожье  
**ОБДУЛ Д. В.**, инженер каф. ОМД, ЗНТУ, г. Запорожье  
**ДИБРОВА Е. А.**, студент, каф. ОМД, ЗНТУ, г. Запорожье

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОСАДКИ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Показано аналитическое решение плоской осесимметричной задачи теории пластичности. Поля напряжений описываются гармоническими координатными функциями. Параметры решения подтверждаются тестовыми расчетами в рамках единой математической модели.

Ключевые слова: обобщенная модель, поля напряжений, гармоническая функция.